

Weder das Bohrsche Atommodell noch Sommerfelds Erweiterung kamen in einem einzigen Schöpfungsakt zur Welt. Niels Bohr (1885–1962) gelangte auf recht verwickelten Wegen zu seinem Modell [[Heilbron and Kuhn, 1969](#), [Hoyer, 1981](#)]. Er bewirkte damit auch nicht sofort einen Umsturz in der Atom- und Quantenphysik. Auch der Sommerfeldschen Erweiterung ging eine komplexe Entwicklung voraus. Das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell bewirkte ebenfalls keinen plötzlichen Umbruch, sondern eröffnete nur eine weitere Etappe auf dem Weg zu einer immer aufs Neue in Frage gestellten Atomtheorie, die Mitte der 1920er Jahre in der Quantenmechanik gipfelte [[Kragh, 2012](#)]. Für Arnold Sommerfeld (1868–1951) handelte es sich bei seinen Arbeiten 1915/16 nicht um eine Revolution, sondern um Schritte in einem Prozess, der besser als eine Evolution zu charakterisieren ist. Er nahm das Bohrsche Atommodell bereits unmittelbar nach seiner Veröffentlichung zur Kenntnis, machte es jedoch erst nach einer längeren Inkubationsphase zum eigenen Forschungsthema. Die in seinen Arbeiten von 1915 und 1916 publizierte Theorie hatte zuvor bei Vorlesungen, Kolloquien und im brieflichen Austausch mit Kollegen in der einen oder anderen Form ihre erste Bewährungsprobe zu bestehen. Danach machte er die Atomtheorie zum Gegenstand von Doktorarbeiten und Habilitationen in seinem Institut [[Eckert, 1993](#), [Seth, 2010](#)]. Nur in der historischen Annäherung kann es gelingen, diesen Prozess der Theoriebildung angemessen darzustellen.

Dies ist nicht die erste historische Rekonstruktion der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie [[Jammer, 1966](#), [Nisio, 1973](#), [Benz, 1975](#), [Kragh, 1985](#), [Robotti, 1986](#), [Eckert, 1995](#)]. Bei den früheren Darstellungen galt jedoch das Augenmerk nur am Rande den beiden im Teil II abgedruckte Akademieberichte. Im Rückblick lässt sich der Weg zur Quantenmechanik mit Sommerfelds „geläuterter“ Darstellung in den *Annalen der Physik* leichter beschreiten. Aber es bedarf bei einer historischen Rekonstruktion auch des Wissens um die Voraussetzungen, mit denen dieser Weg besritten werden konnte, und um die Sackgassen und Irrwege, die davon abzweigten. Dazu ist es notwendig, den Blick auch auf die noch nicht ausgereiften Vorstellungen zu richten und insbesondere das sehr umfangreiche Quellenmaterial in die Untersuchung einzubeziehen, das in den letzten Jahrzehnten

verfügbar wurde (ASWB I). In diesem Kapitel soll beleuchtet werden, wie sich Sommerfeld vor der Bohrschen „Trilogie“ der Atom- und Quantentheorie näherte. Er gehörte 1911 zum illustren Teilnehmerkreis des ersten Solvay-Kongresses, der dem Thema „Theorie der Strahlung und Quanten“ gewidmet war und als ein internationaler Auftakt für die Entwicklung der modernen Atom- und Quantentheorie gilt [Mehra, 1975]. Dies könnte die Vermutung nahelegen, dass Sommerfelds Forschung seit langem um die Fragen kreiste, die auch Bohr bewegten, und dass seine frühen Forschungen zur Quantentheorie bei seiner Erweiterung des Bohrschen Atommodells eine bedeutende Rolle spielten. Tatsächlich besteht zwischen Sommerfelds früher Quantentheorie und der des Jahres 1915 kaum eine Beziehung. Dennoch wäre die Bohr-Sommerfeldsche Atomtheorie ohne Berücksichtigung dieser Vorgeschichte kaum verständlich.

Sommerfeld war von seiner Karriere her eigentlich nicht prädestiniert, sich auf dem Gebiet der Atomtheorie einen Namen zu machen.¹ Er hatte in Königsberg bei Ferdinand Lindemann (1852–1939) promoviert und seine Karriere danach in Göttingen als Assistent von Felix Klein (1849–1925) fortgesetzt. Die ersten zehn Jahre seiner Laufbahn verbrachte er als Mathematiker auf einem Lehrstuhl an der Bergakademie Clausthal (1897–1900) und als Professor für Mechanik an der Technischen Hochschule Aachen (1900–1906), bevor er auf einen 1890 für Ludwig Boltzmann (1844–1906) eingerichteten Lehrstuhl für theoretische Physik nach München berufen wurde. Und auch hier deutete lange nichts darauf hin, dass er die Atom- und Quantentheorie zu seinem Hauptforschungsgebiet machen würde. In den ersten Jahren seiner Münchner Tätigkeit interessierte er sich mehr für Probleme der drahtlosen Telegrafie, Hydrodynamik und Röntgenstrahlen als für die noch junge Quantentheorie [Eckert, 1999].

1.1 Von den Röntgenstrahlen zur Quantentheorie

Mit der Berufung nach München zeichnete sich zunächst nur Sommerfelds Entschlossenheit ab, die theoretische Physik in ihrer ganzen Breite zu seinem Lehr- und Forschungsgebiet zu machen. Die Themen, mit denen er sich in Göttingen, Clausthal und Aachen beschäftigt hatte, und seine mathematische Herangehensweise prägten auch seine ersten Münchner Jahre. Dennoch wollte Sommerfeld nicht nur seinen virtuoson Umgang mit der Mathematik bei immer neuen physikalischen Problemen demonstrieren.

Dies zeigt sich besonders deutlich an seinen Bemühungen, dem Wesen der Röntgenstrahlen näher zu kommen. Er stützte sich dabei auf die von Gabriel Stokes (1819–1903), Emil Wiechert (1861–1928) und Joseph John Thomson (1856–1940) entwickelte Vorstellung, dass es sich bei den Röntgenstrahlen um elektromagnetische Impulse handelt, die beim Aufprall der Kathodenstrahlen auf die Antikathode in einer Röntgenröhre entstehen [Wheaton, 1983]. Um die Jahrhundertwende hatte Sommerfeld versucht, für solche Impulse eine Beugungstheorie zu formulieren und damit Experimente zu erklären, bei denen

¹ Zur Biografie Sommerfelds siehe [Benz, 1975, Eckert, 2013].



Abb. 1.1 Arnold Sommerfeld im Jahr 1909 (DMA CD 66313)

Röntgenstrahlen an sehr engen Spalten gebeugt wurden. Die mathematische Theorie der Beugung war schon Gegenstand von Sommerfelds Habilitation [Sommerfeld, 1896]; mit der Anwendung auf Röntgenimpulse hoffte er, die in den Röntgenimpulsen enthaltenen Wellenlängen bestimmen zu können [Sommerfeld, 1899, Sommerfeld, 1901]. Aber weder die Experimente noch Sommerfelds Theorie ergaben einen zweifelsfreien Beweis dafür, dass es sich bei Röntgenstrahlen tatsächlich um elektromagnetische Wellen handelt. „Es ist eigentlich eine Schmach, dass man 10 Jahre nach der Röntgen’schen Entdeckung immer noch nicht weiß, was in den Röntgenstrahlen eigentlich los ist“, hatte Sommerfeld 1905 an Willy Wien (1864–1928) geschrieben, der als Nachfolger Röntgens (1845–1923) an der Universität Würzburg über Röntgenstrahlen forschte.²

Als Sommerfeld ein Jahr später in München Röntgens Kollege wurde, muss er die „Schmach“ als eine persönliche Herausforderung empfunden haben, endlich Klarheit über das Wesen der Röntgenstrahlen zu gewinnen. Von experimenteller Seite gab es dafür eini-

² An W. Wien, 13. Mai 1905. DMA NL 56, 010. Auch in ASWB I.

ge neue Befunde. Charles Glover Barkla (1877–1944) hatte einen primären Röntgenstrahl auf Paraffin gerichtet und einen davon ausgehenden und zum primären Strahl senkrecht stehenden Röntgenstrahl ausgeblendet, den er daraufhin erneut an Paraffin streute. Er konnte mit diesen Experimenten zeigen, dass Röntgenstrahlen polarisierbar sind, oder, um es mit Barklas eigenen Worten auszudrücken, „produced by the motion of electrons controlled by the electric force in the primary Röntgen pulses“ (zitiert in [Wheaton, 1983, S. 46]). Barkla zeigte aber auch, dass der primäre Röntgenstrahl, der in einer Röntgenröhre von den Elektronen des Kathodenstrahls im Metall der Antikathode erzeugt wird, einen unpolarisierten Anteil enthalten musste; denn bei der Bestrahlung von Metallen mit einem primären Röntgenstrahl entstand auch „a homogeneous radiation characteristic of the element emitting it, and produced by the motion of electrons uncontrolled by the electric force in the primary pulses“ (zitiert in [Wheaton, 1983, S. 101]). Daraus schloss Sommerfeld, dass bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen zwei Prozesse beteiligt sein mussten: Die unpolarisierte „charakteristische“ Röntgenstrahlung deutete auf einen inneratomaren Prozess hin, sonst würde sie keine charakteristische Materialabhängigkeit aufweisen; der andere Prozess, der für den polarisierten Anteil in der Röntgenstrahlen verantwortlich war, deutete auf einen rein elektrodynamischen Vorgang hin. Für den polarisierten Anteil sollte sich eine Abhängigkeit der ausgestrahlten Röntgenintensität von der Richtung ergeben (ähnlich wie bei einem Hertzschen Oszillator, der elektromagnetische Wellen keulenförmig quer zur Schwingungsrichtung der elektrischen Ladungen abstrahlt). Die „charakteristische“ Röntgenstrahlung sollte dagegen mit gleicher Intensität in alle Richtungen abgestrahlt werden.

Die Polarisation und die räumliche Verteilung der Intensität der von einer Quelle abgestrahlten Röntgenstrahlen wurden auch für die Experimentalphysiker in München zum Gegenstand neuer Forschungen. Johannes Stark (1874–1957), der an der Technischen Hochschule in Aachen mit Röntgenstrahlen experimentierte, publizierte 1909 Messergebnisse, die eine räumliche Anisotropie der von einer Kohle-Antikathode ausgesandten Röntgenintensität belegten. Er sah darin einen Beweis dafür, dass die Hypothese der elektromagnetischen Impulse falsch sein müsse, da er irrtümlich annahm, dass diese eine nach allen Richtungen gleichförmige Intensitätsverteilung ergeben würde. Für Stark offenbarte sich in der räumlichen Anisotropie die Quantennatur der Röntgenstrahlung [Hermann, 1969, S. 96–98].

Sommerfeld hatte seit seinen Arbeiten um 1900 über die Beugung von Impulsen an einem Spalt nichts mehr über Röntgenstrahlen publiziert. Nun sah er die Gelegenheit gekommen, der elektromagnetischen Impulstheorie der Röntgenstrahlen eine theoretische Grundlage zu geben – und gleichzeitig Starks Auffassung, dass diese Theorie keine anisotrope Intensitätsverteilung ergeben würde, richtig zu stellen. Wie er betonte, handelte es sich eigentlich nicht um eine neue physikalische Theorie, sondern nur darum, die bei der Abbremsung eines Elektrons entstehende elektromagnetische Strahlung zu berechnen. Dazu genüge es, „einige im Grunde bekannte Formeln zusammenzustellen“ und sie auf die Verhältnisse anzuwenden, wie sie in den Experimenten von Stark vorlagen. Sommerfeld behauptete nicht, dass er damit die Entstehung der Röntgenstrahlen restlos aufgeklärt habe,

denn seine Theorie bezog sich nicht auf die charakteristische Strahlung. „Es ist sehr wohl möglich, dass hierbei das Plancksche Wirkungsquantum eine Rolle spielt“, räumte er ein [Sommerfeld, 1909, S. 970]. Jedoch für den Teil der Strahlung, der für die anisotrope Intensitätsverteilung verantwortlich war, bedurfte es keiner Quantentheorie. „Sie werden sich, wie ich hoffe, überzeugen“, schrieb er an Stark, „dass die Bremstheorie der Röntgenstrahlen alles das von selbst leistet, wozu Sie die (doch sehr hypothetische und unbestimmte) Lichtquantentheorie heranziehen. Nicht als ob ich an der Bedeutung des Wirkungsquantums zweifelte. Aber die Ausgestaltung, die Sie ihm geben, scheint nicht nur mir, sondern auch Planck sehr gewagt.“³

Damit gab Sommerfeld zu erkennen, dass er dem Planckschen Wirkungsquantum durchaus Bedeutung bei maß, aber nicht so weit gehen mochte wie Einstein (1879–1955), der 1905 eine Quantennatur des Lichts postuliert hatte, und Stark, der dies auch für Röntgenstrahlen annahm. Sommerfeld vermutete wie Planck (1858–1947), dass das Wirkungsquantum bei der Absorption und Emission von Strahlung eine Rolle spielt, die Strahlung selbst aber den Gesetzen der Maxwellschen Elektrodynamik gehorcht und keiner Quanteninterpretation bedürfe. Stark sah sich bloßgestellt und geriet darüber mit Sommerfeld in einen heftigen Streit [Hermann, 1967]. Einstein jedoch war trotz seiner Lichtquantenhypothese begeistert. „Seit langem hat mir nichts Physikalisches solchen Eindruck gemacht wie jene Arbeit von Ihnen über die Verteilung der Energie der Röntgenstrahlung über die verschiedenen Richtungen“, schrieb er an Sommerfeld.⁴ Anders als Stark sah Einstein in Sommerfelds „Bremstheorie“ kein Argument gegen die Lichtquantenhypothese, sondern einen weiteren Anlass, dem mit der Quantentheorie heraufbeschworenen Welle-Teilchen-Dualismus auf den Grund zu gehen.

1.2 Die h -Hypothese

Die von Sommerfeld berechnete Richtungsverteilung der Röntgenintensität zeigte eine starke Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der auf die Antikathode aufprallenden Elektronen. Bei kleiner Aufprallgeschwindigkeit erfolgte die Ausstrahlung wie bei einem Hertzschen Oszillator mit dem Intensitätsmaximum senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen, bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit wurde es in der Bewegungsrichtung der Elektronen nach vorne gebündelt. Eine derart gebündelte elektromagnetische Ausstrahlung konnte wie ein Teilchenstrom erscheinen. War auch die radioaktive γ -Strahlung das Ergebnis eines solchen elektrodynamischen Prozesses? Über die Natur der γ -Strahlung war um 1910 noch weniger bekannt als über Röntgenstrahlen. Die aus einer Radiumprobe emittierten γ -Strahlen traten aber immer gemeinsam mit β -Strahlen auf, von denen man wusste, dass es sich um schnelle Elektronen handelt. Es lag also na-

³ An Stark, 4. Dezember 1909. Stark-Nachlass, Staatsbibliothek zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz, Handschriftenabteilung. Auch in ASWB I.

⁴ Von Einstein, 19. Januar 1910. DMA, NL 89, 007. Auch in ASWB I.

he, für beide Strahlenarten einen gemeinsamen Entstehungsmechanismus anzunehmen. Wenn bei der plötzlichen Bremsung von schnellen Elektronen Röntgenstrahlen emittiert werden, so überlegte Sommerfeld, dann sollte auch die plötzliche Emission von Elektronen (β -Strahlen) zur Emission von gebündelter elektromagnetischer Strahlung (γ -Strahlen) führen.

„Wie üblich, fassen wir den γ -Strahl als den die Aussendung des β -Strahls begleitenden Röntgenimpuls auf. Dieser berechnet sich ganz ebenso wie der umgekehrte Vorgang, die Bremsung eines Kathodenstrahls, der zu den gewöhnlichen Röntgenimpulsen Anlass gibt.“ [Sommerfeld, 1911b, S. 3] So leitete Sommerfeld eine Abhandlung „Über die Struktur der γ -Strahlen“ ein, die er im Januar 1911 der Bayerischen Akademie der Wissenschaften präsentierte. Während er sich bei der „Bremstheorie“ der Röntgenstrahlen aber nur für die Richtungsverteilung der Röntgenintensität interessiert hatte (d. h. für die Berechnung des Poynting-Vektors, also der momentanen Ausstrahlung während der Bremsung), rückte er nun den gesamten Brems- bzw. Beschleunigungsvorgang ins Zentrum. Insbesondere wollte er die Energiebilanz bei jedem solchen Vorgang berechnen, da er sich davon eine experimentelle Überprüfung seiner Theorie erhoffte. Im Fall der γ -Strahlen betraf dies das Verhältnis der Energie des emittierten Elektrons E_β zu der in Form von elektromagnetischer Strahlung emittierten Energie E_γ als Funktion der Geschwindigkeit des β -Elektrons. Dazu musste Sommerfeld jedoch die Dauer des Beschleunigungsvorgangs als Unbekannte in seine Berechnung einführen.

Um diese Lücke seiner Theorie zu schließen, nahm Sommerfeld Zuflucht bei der Quantentheorie: „So hypothetisch die bisherigen Betrachtungen schon sind, wollen wir doch versuchsweise durch Einführung einer neuen Hypothese sie einen Schritt weiterführen, um das Verhältnis E_β/E_γ durch lauter bekannte Größen auszudrücken und als reine Funktion der Geschwindigkeit anzugeben. Wir übertragen nämlich die Fundamentalhypothese der Planckschen Strahlungstheorie auf die radioaktiven Emissionen und nehmen an, dass bei jeder solchen Emission gerade ein Wirkungsquantum h abgegeben wird.“ [Sommerfeld, 1911b, S. 24–25] Er setzte die Wirkung eines Emissionsvorgangs, d. h. das Produkt der bei der Emission abgegebenen Energie mit der Dauer des Beschleunigungsvorgangs, gleich dem Planckschen Wirkungsquantum h . Diese Hypothese erlaubte ihm den Vergleich mit experimentell gemessenen Werten von E_β/E_γ und führte ihn zu dem Schluss, „dass der Beschleunigungsweg l ein sehr kleiner Bruchteil der Moleküldimensionen (10^{-8} [cm]) ist“, was ihm sehr plausibel erschien, denn radioaktive Zerfälle sollten sich im Innern von Atomen abspielen. Ein Widerspruch „würde sich nur ergeben, wenn $l > 10^{-8}$ [cm] gefunden würde.“ [Sommerfeld, 1911b, S. 29]

Die Hypothese ließ sich auch auf den Bremsvorgang eines Elektrons in der Antikathode einer Röntgenröhre anwenden. In diesem Fall handelte es sich um das Verhältnis der bei einem Aufprall eines Kathodenstrahl-Elektrons abgegebenen Energie E_k zu der in Form eines Röntgenimpulses abgegebenen Energie E_{rpol} (wobei das „pol“ besagt, dass es sich nur um den polarisierten, nicht um den charakteristischen Anteil der Röntgenstrahlung handelt). Wenn man die sehr groben experimentellen Daten für dieses Energieverhältnis heranzog, ergab sich für den „Bremsweg l “ ein Wert, der ebenfalls in der Größenordnung

von 10^{-8} cm lag, also wiederum, wie Sommerfeld feststellte, „ein sehr kleiner Bruchteil der Moleküldimensionen“ [Sommerfeld, 1911b, S. 32]. Dass er den Bremsweg bzw. die Bremsdauer als unbekannte Konstante in seine Theorie einführen musste und sie nicht wie den Bremsvorgang selbst rein elektrodynamisch berechnen konnte, sah er darin begründet, dass diese Konstante „eine Eigenschaft des bremsenden Moleküls“ ist. Es sei deshalb naheliegend, „sie aus der universellen Eigenschaft aller emittierenden oder absorbierenden Moleküle zu entnehmen, die in dem Planckschen Wirkungsquantum zum Ausdruck kommt. Erst durch dieses Eingreifen der Strahlungstheorie wird die elektromagnetische Theorie der Röntgenstrahlen völlig bestimmt. Beide Theorien schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich. [...] Über den elektromagnetischen Mechanismus des h erfahren wir aus unserer Anwendung desselben auf die Röntgenstrahlung nichts. Sowenig wie die Existenz des Wirkungsquantums den elektrischen Ausbreitungsvorgang stört (sie beeinflusst ihn nur durch Bestimmung eines sonst unbestimmten Parameters), sowenig kann die elektromagnetische Theorie die Existenz des Wirkungsquantums hindern oder erklären“ [Sommerfeld, 1911b, S. 41].

Für die Elektrodynamik war nach Heinrich Hertz (1857–1894) das System der Maxwell'schen Gleichungen die axiomatische Grundlage. Eine ähnliche Rolle sprach Sommerfeld nun dem Planckschen Wirkungsquantum für die Atomphysik zu, d. h. für Prozesse, die sich im Bereich von „Moleküldimensionen“ abspielen. Er sah darin den Ausdruck einer „universellen Eigenschaft aller emittierenden oder absorbierenden Moleküle“. Die fundamentale Bedeutung von h sollte sich, so argumentierte Sommerfeld im September 1911 bei einem Vortrag in Karlsruhe, auch bei anderen „Molekularprozessen“ zeigen, wie zum Beispiel dem lichtelektrischen Effekt. Diese Erscheinung war für Sommerfeld nicht wie für Einstein ein Beleg für die Quantennatur des Lichts, sondern ein „Resonanzphänomen, bei dem das an das Atom quasielastisch gebundene Elektron ebenso reagiert wie z. B. in der Dispersionstheorie“. Er stellte sich vor, dass das Elektron durch das eingestrahlte Licht in Schwingung versetzt wird und während einer gewissen „Akkumulationszeit“ solange Energie aufnimmt, bis die Schwingung sich zur Resonanzkatastrophe aufschauelt und das Elektron aus dem Atom herausgeschleudert wird. Auch in diesem Fall könne auf das Produkt aus Energie und Akkumulationszeit seine „Grundhypothese“ angewandt werden. Für die detaillierte Ausarbeitung der Theorie verwies er auf eine künftige Publikation, die er zusammen mit seinem Assistenten Peter Debye (1884–1966) veröffentlichen wollte. Zunächst ging es ihm nur darum, der h -Hypothese ein weiteres Anwendungsfeld zu erschließen und die „Auffassung des Wirkungsquantums gegen die Methode der Energiequanten zu orientieren“. Außerdem sah er in seiner Auffassung gegenüber der Lichtquantenhypothese von Einstein den Vorteil, dass sie „der Elektrodynamik zwar fremd, aber mit ihr verträglich“ sei [Sommerfeld, 1911a, S. 1065].

Der Vortrag in Karlsruhe diente Sommerfeld als Generalprobe für den wenig später in Brüssel stattfindenden ersten Solvay-Kongress. Bei dieser Gelegenheit kam es zum ersten Mal zu einer breiten Diskussion über die verschiedenen Quantenauffassungen [Mehra, 1975, S. 13–72]. Planck präsentierte in Brüssel seine sog. „zweite“ Theorie, wonach bei der Wärmestrahlung nur die Emission quantenhaft ablaufen sollte, für das



Abb. 1.2 Die Teilnehmer des Solvay-Kongresses 1911 (Wikipedia)

Verständnis der Absorption der Strahlung jedoch die gewöhnliche Elektrodynamik genüge [Kuhn, 1978, Kap. 10]. Sommerfeld und Planck hatten ihre Quantenauffassungen zuvor schon brieflich ausgetauscht. Im Juli 1911 hatte Sommerfeld der Bayerischen Akademie der Wissenschaften den Vorschlag unterbreitet, Planck wegen seiner Verdienste um die Quantentheorie zum korrespondierenden Mitglied zu ernennen, obwohl er nicht verhehlte, dass Plancks Theorie „nicht als endgültig befriedigend angesehen werden“ könne.⁵ Beim Solvay-Kongress betonte Sommerfeld, dass es bei seiner Theorie um „unperiodische Molekularprozesse“ gehe, während in der Theorie von Planck das periodische Hin- und Herschwingen elektrischer Ladungen quantisiert werde.

Die h -Hypothese stieß in Brüssel auf große Resonanz. Die Diskussion nach Sommerfelds Vortrag gehörte zu den lebhaftesten der ganzen Tagung. Sie erstreckte sich im Konferenzbericht über zwanzig Druckseiten. Dabei erschien Sommerfelds Quantenauffassung geradezu absurd, wenn man sie auf Erscheinungen aus der Alltagserfahrung übertrug: Beim Vergleich von zwei Molekularprozessen, in denen verschieden große Energiemengen zur Wirkung kommen, sollte der mit der größeren Energie kürzer als der mit der kleineren Energie sein, da das Produkt aus Energie mal Zeit in beiden Fällen gleich sein sollte. Das Eindringen eines molekularen Projektils in eine Wand würde bei hoher Geschwindigkeit zu einer kleineren Eindringtiefe führen als bei einem langsameren Projektil, was

⁵ An die Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1. Juli 1911. Archiv der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Personalakte Planck.

<http://www.springer.com/978-3-642-35114-3>

Die Bohr-Sommerfeldsche Atomtheorie
Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Atommodells
1915/16
Sommerfeld, A.
2013, XI, 151 S. 89 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-642-35114-3